

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

КОНДРАТЕНКО Олександр Миколайович



УДК 621.43.068.4

ЗНИЖЕННЯ ВИКИДУ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК  
ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ,  
ЩО ПЕРЕБУВАЮТЬ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі поршневих енергоустановок Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Строков Олександр Петрович,**  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,  
завідувач відділу поршневих енергоустановок

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Тартаковський Едуард Давидович,**  
Українська державна академія  
залізничного транспорту, м. Харків,  
завідувач кафедри експлуатації та ремонту  
рухомого складу

кандидат технічних наук, доцент  
**Васильєв Ігор Павлович,**  
Східноукраїнський національний університет  
ім. Володимира Даля, м. Луганськ,  
доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння

Захист відбудеться «26» грудня 2013 р. у 13<sup>00</sup> годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.13 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе 21, кафедра двигунів внутрішнього згоряння, ауд. 11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе 21.

Автореферат розісланий «25» листопада 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Осетров О.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Поліпшення екологічних показників двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) є однією з основних задач, що стоїть перед провідними спеціалістами у галузі двигунобудування в усіх розвинутих країнах світу. Вимоги до екологічних показників двигунів є загальнообов'язковими, оскільки їх закріплено на законодавчому рівні. У країнах ЄС для автотранспортних засобів (АТЗ) наразі діють норми Правил ЄЕК ООН R – 49 рівня EURO V, за якими середньоексплуатаційний викид твердих частинок (ТЧ)  $g_{TЧ}$  з відпрацьованими газами (ВГ) дизелів, визначений за циклом ESC, не має перевищувати 0,02 г/(кВт·год). На ТЧ припадає 20 – 45 % сумарної еквівалентної токсичності ВГ дизелів, оскільки вони містять канцерогенні та мутагенні речовини.

З іншого боку, значний внесок у забруднення навколишнього середовища викидами ТЧ обумовлено великою кількістю об'єктів у структурі парку АТЗ нашої країни, що оснащені дизелями, старіші за 15 років і не мали від початку експлуатації засобів зниження токсичності ВГ. Дизелізація світового парку АТЗ і широке розповсюдження в їх конструкції систем рециркуляції ВГ, які потребують їх обов'язкового очищення, формують потребу у розробці і впровадженні таких засобів. Особливо гостро ця потреба постає для АТЗ, що працюють в умовах обмеженого повітрообміну та в місцях скупчення людей – це маневрові тепловози, складські, кар'єрні, будівельні та шахтові машини, судна, що працюють у акваторії курортних міст та військова техніка.

Провідне місце у структурі засобів зниження викиду ТЧ дизелів та підготовки ВГ для рециркуляції посідають різноманітні системи, що очищують ВГ та найчастіше містять так звані фільтри твердих частинок (ФТЧ), що відфільтровують ТЧ з потоку ВГ, накопичують їх та утримують до моменту очищення самих фільтрів (регенерації). Однак, такі пристрої мають певні недоліки, такі як: висока собівартість (приблизно 900 \$ за фільтруючий елемент (ФЕ) та 1200 \$ за ФТЧ), низькі показники технологічності (потребують високої культури виробництва і експлуатації, містять складні й прецизійні конструктивні елементи та каталітичні покриття) та надійності у експлуатації (схильні до термошокового руйнування та абразивного зносу, чутливі до використання неякісних паливо-мастильних матеріалів, їх ресурс складає 100 – 150 тис. км пробігу АТЗ), створення протитиску у випускній системі дизеля (3,5 – 25 кПа), періодична потреба у витратах енергії для відновлення робочих якостей (до 10 % середньоексплуатаційних питомих ефективних витрат палива дизелем).

Таким чином, вирішення задачі зменшення викидів ТЧ з ВГ дизелів (нових і, особливо, таких, що перебувають в експлуатації), за рахунок застосування ФТЧ вітчизняного виробництва, який не містить каталітичних покриттів, має високі ефективність, універсальність, технологічність виготовлення і експлуатаційну надійність, та разом з тим невеликі гідравлічний опір (ГО), собівартість і масогабаритні показники, є актуальним завданням, яке визначає напрям дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано у відділі поршневих енергоустановок Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за планами науково-дослідних робіт відповідно до завдань держбюджетних прикладних тем НАН України: «Науково-технічні засади підвищення рівня економічних та екологічних показників енергоустановок з ДВЗ за рахунок розробки нових структурних схем та удосконалення методів використання альтернативних моторних палив» (2010 – 2013 рр., ДР № 0110U002660); «Розробка маловитратної технології та автоматизованої системи очищення відпрацьованих газів дизеля від твердих часток» (2011 – 2012 рр., ДР № 0111U001762), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є поліпшення екологічних показників транспортних дизелів, що знаходяться у експлуатації, за рахунок очищення їх відпрацьованих газів від твердих частинок розробленим фільтром твердих частинок.

Для реалізації поставленої мети передбачено вирішення наступних *задач*:

1. Аналіз, систематизація та узагальнення інформації щодо існуючих методів та засобів очищення ВГ дизеля від ТЧ.
2. Розробка і обґрунтування конструкції ФТЧ дизеля.
3. Розробка методики, засобів та об'єктів фізичного моделювання процесів у фільтруючому елементі.
4. Експериментальне отримання даних, необхідних для математичного моделювання

процесу руху аерозолу "ВГ дизеля – ТЧ" у ФЕ.

5. Розрахункове дослідження процесів у ФЕ за допомогою математичної моделі руху ідеального газу.

6. Експериментальне дослідження робочих характеристик ФТЧ у складі випускної системи дизеля при його випробуваннях за стандартизованими циклами.

7. Розробка рекомендацій щодо практичного застосування результатів дисертації.

*Об'єкт дослідження* – процес очищення відпрацьованих газів дизеля від твердих частинок.

*Предмет дослідження* – вплив конструктивних особливостей фільтрів твердих частинок на робочі характеристики дизеля, зокрема на характеристики викидів твердих частинок.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети на основі системного підходу застосовані аналітичні (аналіз та синтез інформації при літературно-патентному пошуку, метод лінійної регресії), розрахунково-теоретичні (методи кінцевих об'ємів, розщеплення операторів, фіктивних областей та взаємопроникних континуумів при математичному моделюванні процесів у ФТЧ) та експериментальні методи (дослідження властивостей матеріалів складових ФТЧ, а також параметрів роботи макетних зразків ФЕ на моторному випробувальному стенді (МВС) та безмоторній дослідницькій установці (БДУ) відділу поршневих енергоустановок ІПМаш НАНУ).

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше оцінено кількісний вплив геометричних характеристик структурних елементів різних варіантів фільтрів твердих частинок та інтенсивності руху в них середовищ, на кінематичні параметри потоків аерозолу "ВГ дизеля – ТЧ".

2. Вперше встановлено кількісні характеристики зв'язку між конструктивними параметрами обраного варіанту фільтра твердих частинок та середньоексплуатаційним викидом твердих частинок дизелем 2С110,5/12.

3. Вперше встановлено кількісні характеристики зв'язку між конструктивними параметрами обраного варіанту фільтра твердих частинок та часом його захисної дії.

4. Вперше створено математичну модель, що встановлює зв'язок між робочими характеристиками фізичної моделі фільтра твердих частинок, які отримано експериментальним шляхом на безмоторній дослідницькій установці при холодній продувці, та характеристиками повнорозмірного фільтра у реальних умовах експлуатації.

**Практична цінність одержаних результатів** для двигунобудування полягає у наступному:

– розроблено модульну конструкцію ФТЧ дизеля, ФЕ якого побудовано на перспективному принципі роботи, що полягає у комплексному використанні ефекту інерційного впливу на ТЧ, процесів фільтрації та адсорбції, а також, на відміну від більшості традиційних фільтрів, у його функціонуванні без використання каталітичних покриттів. ФЕ характеризується порівняно малою собівартістю виготовлення, прийнятними величинами гідравлічного опору і масогабаритних показників та порівняно задовільною ефективністю очищення ВГ від ТЧ. На такій основі може бути побудовано типорозмірний ряд ФТЧ для транспортних дизелів, як нових, так і тих, що експлуатуються. Запропоновано технічне рішення ФТЧ для очищення ВГ у системах рециркуляції поршневих ДВЗ;

– розроблено методики експериментального дослідження робочих характеристик діючих макетних зразків фільтруючого елементу ФТЧ і елементів їх конструкції, які можуть бути використані при розробці нових конструкцій ФТЧ дизелів та випробуваннях ДВЗ, що містять ФТЧ, за стандартизованими випробувальними циклами;

– розроблено безмоторну дослідницьку установку, що придатна для порівняльних експериментальних досліджень процесів у макетних зразках ФЕ і його елементів конструкції з масштабом поперекового перетину до 1:30, та дозволяє візуалізувати досліджувані процеси і підвищити безпеку їх дослідження;

– адаптовано до об'єкту дослідження математичну модель процесу руху потоку аерозолу "ВГ дизеля – ТЧ" з урахуванням взаємодії з активною поверхнею ФТЧ у вигляді сталевітної сітки та насипки з фрагментів мінеральних жаростійких сорбентів природного походження, що описані як пористі тіла (ПТ) різного типу, доповненням її даними щодо властивостей матеріалів ФЕ та текучого середовища (ТС);

– експериментально отримані витратні характеристики різних варіантів конструкції макетного зразка модуля ФЕ на БДУ та робочі характеристики діючих макетних зразків ФЕ на моторному випробувальному стенді, які дозволяють сформулювати крайові умови і дані для адаптації та

ідентифікації математичної моделі процесу руху аерозолу "ВГ дизеля – ТЧ" у ФЕ і рекомендації щодо створення нових зразків ФТЧ.

Результати дослідження використовуються у навчальному процесі на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння НТУ "ХП", у відділі поршневих енергоустановок ПММаш НАН України (м. Харків) та на ПП "АВТОТРАНС-Т" (м. Балаклея), що підтверджено відповідними актами про впровадження та використання.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати, які винесено на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведення літературно-патентного пошуку за темою роботи, класифікація засобів очищення ВГ від ТЧ; розробка конструкції ФЕ ФТЧ дизеля та обґрунтування його геометричних параметрів і конструктивних особливостей; розробка та виготовлення БДУ і об'єктів дослідження на ній, складання методики та проведення розрахунково-експериментального дослідження гідравлічних характеристик ФТЧ; проведення розрахункового дослідження процесу руху аерозолу "ВГ дизеля – ТЧ" у модулі ФЕ; розробка модернізованої системи відбору проб ВГ на токсичність для МВС та складання методики досліджень на ній; розробка та виготовлення діючих макетних зразків ФЕ і участь у проведенні експериментального дослідження їх робочих характеристик на МВС; розробка рекомендацій щодо застосування результатів роботи.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідалися на: XVIII – XX Міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 2010 – 2012 рр.), Конференціях молодих вчених та спеціалістів "Сучасні проблеми машинобудування" (Харків, 2010 – 2012 рр.), II Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми и перспективы – автомобилестроения и автомобильного транспорта» (Харків, 2011 р.), XV –XVII Міжнародних конгресах двигунобудівників (с. Рибаче, АР Крим, 2010 – 2012 рр.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 13 наукових праць: 9 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 1 одноосібна та 4 – у матеріалах конференцій.

**Обсяг і структура роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4-х розділів, висновків та 10 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 288 сторінок, з них 24 рисунки за текстом, 44 рисунки на 32 сторінках, 6 таблиць за текстом, 7 таблиць на 7 сторінках, 205 найменувань використаних науково-технічних джерел на 22 сторінках, 10 додатків на 90 сторінках.

## ОСНОВИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито сутність та стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення результатів дисертації, наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію та публікацію основних положень роботи.

У **першому розділі** здійснено аналіз, узагальнення та систематизацію інформації щодо світового досвіду у галузі підвищення екологічних характеристик дизелів. Дослідженнями різних аспектів екологічності ДВЗ займалися В.В. Бразовський, І.П. Васильєв, Ю.Ф. Гутаревич, В.О. Звонов, П.М. Канило, А.П. Кудряш, О.Р. Кульчицький, А.М. Левтеров, В.А. Марков, В.П. Матейчик, І.В. Парсаданов, А.П. Полив'ячук, В.И. Смайлис, Е.Д. Тартаковський, та ін., а також спеціалісти таких закордонних фірм та організацій, як AVL, Bosch, Ricardo, Johnson Matthew, Engelhart, Emitech, DCL, Boshart, Rhodia, Volvo, MAN, Toyota, SAE, EPA, CARB та ін.

Виявлено особливості складу ВГ дизелів, що вирізняють їх з поміж інших типів ДВЗ, а саме: наявність у їх складі канцерогенних та мутагенних речовин, вкрай малі розміри ТЧ та невелика (проте значна за токсичністю у приведених величинах) емісія, а також принципова антагоністичність впливу факторів, які обумовлюють вміст нормованих шкідливих речовин у ВГ дизелів, що визначає можливі стратегію та методи боротьби із ними. Методологічно технічні заходи боротьби з викидами ТЧ можна поділити на: 1) вплив на властивості палива і мастила; 2) заходи, спрямовані на удосконалення робочих процесів дизеля; 3) очищення ВГ різноманітними засобами та системами. Останній комплекс заходів для ТЧ реалізують пристрої систем зниження токсичності дизелів, що їх за принципом дії можливо класифікувати наступним чином: 1) механічні (фільтруючі та інерційні); 2) електричні; 3) хімічні (каталітичні, термічні, плазмові, оксидні); 4) рідинні; 5) комбіновані, що отримали найширше застосування. Стратегія боротьби з ТЧ визначає конкретну комбінацію цих методів. Так, застосування рециркуляції ВГ для зниження викидів оксидів азоту дизелями

потребує, з метою запобігання абразивного зносу циліндрів, очищення ВГ, що повертаються до них, яке здійснюється ФТЧ.

Встановлено, що переважна більшість об'єктів у парку АТЗ України з різних причин не відповідає вимогам чинних норм токсичності (наразі – EURO II, згідно з якими  $g_{TC}$  не має перевищувати 0,15 г/(кВт·год)), закріплених законодавчо. При цьому приведення дизеля у відповідність наступному рівню цих норм підвищує його собівартість на 40 %.

Наведено результати патентного пошуку за темою дослідження, проведеного для визначення матеріалів, конструкцій та особливостей функціонування систем і пристроїв для зменшення викидів ТЧ з ВГ дизелів. Виявлено, що ФТЧ, які застосовуються для поліпшення екологічних показників дизелів, що перебувають в експлуатації, можуть не містити деталей з керамічних матеріалів та не оснащуватися бортовими системами регенерації. Такими є: ФТЧ системи рециркуляції ВГ дизеля, розробленої фірмою Engelhart; ФТЧ виробництва фірми DCL; ФТЧ виробництва фірми Ecomix-DPF. Причому ФЕ останніх двох виготовляють з сталевих сіток і мікрофібр та сталеві фольги, але усі три містять каталітичні покриття.

На основі виконаного аналізу запропоновано схему і комбінований принцип роботи ФТЧ, що передбачає видалення ТЧ з спеціальним чином організованого потоку ВГ за допомогою процесів фільтрації та адсорбції.

У **другому розділі** обґрунтовано конструкцію фільтра твердих частинок та його фільтруючого елементу. Розділ також присвячено експериментальним дослідженням гідравлічних характеристик різних варіантів конструкції (конфігурації) макетного зразка модуля ФЕ, а також елементів його конструкції на безмоторній дослідницькій установці.

Розроблений ФЕ має об'єм, що дорівнює або більший за робочий об'єм дизеля, та складається з такої кількості рознімно сполучених між собою однакових модулів, яка забезпечує принаймні рівність їх сумарного прохідного перетину прохідному перетину випускного колектора дизеля. Досліджено декілька варіантів конструкції модуля ФЕ (див. рис. 1). Конструкцію модуля ФЕ остаточно обрано з поміж інших – вар. 5 на рис. 1 – на основі аналізу результатів експериментальних досліджень на БДУ і МВС та математичного моделювання процесів у ньому.

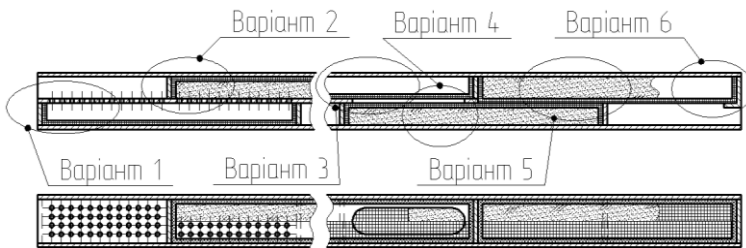


Рис. 1. Варіанти конструкції модуля ФЕ

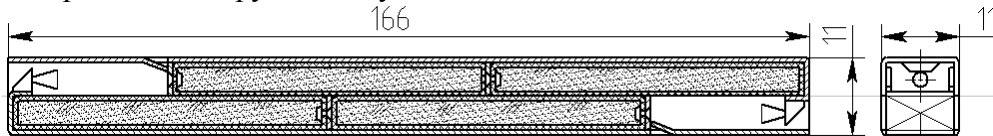


Рис. 2. Остаточно запропонована конструкція модуля ФЕ

Модуль (див. рис. 2) складається з двох типів деталей, що рознімно сполучені між собою – кожух (2 шт.) та касета (4 шт.). Кожух виконаний штампуванням зі сталевих листового прокату та має сформовані в ньому упори для інших деталей. Касета являє собою складальну одиницю, що містить: власне касету

(виконана штампуванням зі сталеві нержавіючої ткані сітки (СНТС)), міжкасетну перетинку (виконана штампуванням зі сталевих листового прокату, сполучена з касетою заклепкою чи точковим зварюванням) та насипку з природного середньофракційного цеоліту (ПЦ). Таким чином, розроблений ФЕ реалізує комбінований спосіб очищення ВГ дизеля від ТЧ, що включає фільтрацію ТЧ сіткою та насипкою, а також їх адсорбцію на поверхнях сталевих пластин, сітки та гранул ПЦ при омиванні їх спеціальним чином організованим потоком аерозолу «ВГ дизеля – ТЧ». На деталях ФЕ відсутнє каталітичне покриття.

Регенерація такого ФЕ можлива будь-яким із відомих методів, у тому числі й шляхом заміни касет з їх подальшою утилізацією чи очищенням. Розроблено схему і принцип роботи системи регенерації І-го роду з плазмотроном, як однієї з можливих, оцінено її витрати енергії.

Сітка, що виготовляється на Заводі ім. Фрунзе (м. Харків), вирізняється широким вибором розмірів комірок, легко піддається механічній обробці, має малу питому вагу, не є дефіцитною та коштовною. Сітка, що застосовується у конструкції розробленого ФЕ, характеризується наступними параметрами: тип плетіння – полотняний, діаметр дроту – 0,09 мм, розміри комірки – 0,14 ×

$\times 0,14$  мм, товщина –  $0,25$  мм. ПЦ – це природній туф, що видобувається на території України і набув широкого та різноманітного використання як жаростійкий високоефективний сорбент з невисокою вартістю. За структурою ПЦ являє собою молекулярне сито зі сталими розмірами пор  $2 - 15 \text{ \AA}$  і має каталітичні й іонообмінні властивості та хімічну спорідненість з речовинами з полярними молекулами. У конструкції розробленого ФЕ застосовується насипка фракцією ПЦ із середнім діаметром частинок  $3$  мм.

Таким чином, можна очікувати, що розроблена конструкція ФЕ буде вирізнятися невисокою собівартістю виробництва та обслуговування за рахунок: рознімності з'єднань деталей, високої технологічності, а також загальнодоступності та невисокої ціни матеріалів ФЕ (наразі складає  $2$  грн. для одного модуля). Також можна очікувати, що високу експлуатаційну надійність розробленої конструкції ФЕ забезпечено за рахунок відсутності схильності його матеріалів до термошокового руйнування та відсутності каталітичних покриттів, що виходять з ладу при використанні неякісних дизельного палива та мастил. Універсальність такого ФЕ обумовлена модульністю конструкції та широким вибором методів його регенерації, а також можливістю використання ФТЧ у якості глушника шуму та/або іскрогасника випускної системи дизеля (за певних умов) і розміщення ФТЧ на борту АТЗ поза підкапотного простору. Порівняно високу ефективність очищення ВГ від ТЧ досягнуто завдяки використанню комбінованого способу роботи. Гідравлічний опір та масогабаритні показники такого ФЕ (для дизеля з робочим об'ємом  $2,0 \text{ дм}^3$  містить не менше  $30$  модулів та важить  $2,0$  кг, його габаритні розміри складають  $60 \times 90 \times 170$  мм) не перевищують показники аналогів. Серійне виробництво ФТЧ з розробленим ФЕ може бути налагоджене на вітчизняних підприємствах машинобудівної галузі.

Для проведення експериментального дослідження процесів, що відбуваються у ФЕ, розроблено та виготовлено БДУ. Установа забезпечує таке значення потоку ТС (атмосферного повітря) крізь макетний зразок модуля ФЕ  $g_m$ , що у  $5$  разів перевищує значення цього параметру у штатній системі випуску моторного ственду для номінального режиму роботи дизеля  $2410,5/12$ . БДУ дозволяє отримувати витратні характеристики (залежності ГО від потоку ТС) для досліджуваних макетів за незмінної температури ТС. Схему БДУ представлено на рис. 3,а. Оцінено похибки прямих та непрямих одноразових вимірювань всіх параметрів на БДУ.

Розроблено та виготовлено макет модуля ФЕ з прозорого матеріалу (ПММ ФЕ), що має рознімну конструкцію, з різними варіантами форми, кількості та розміщення отворів у конструкції сполучної пластини (вар. 1 – 4 на рис. 1), а також з касетами зі сталеві сітки (пустими чи заповненими насипкою з ПЦ), що представлений на рис. 3,б. Для визначення властивостей сітки та насипки з ПЦ, що необхідні для їх опису як пористих тіл при математичному моделюванні процесу руху аерозолу "ВГ дизеля – ТЧ" у модулі ФЕ, розроблено та виготовлено тримач сіток (рис. 3,в), пакети з  $1 \div 7$  шарів сітки та з двох шарів сітки із зазором між ними  $0 \div 5,5$  мм, тримач насипки (рис. 3,г) та власне насипка.

У ході експериментального дослідження за розробленою методикою отримано витратні характеристики різних варіантів конструкції ПММ ФЕ та різних конфігурацій зразків сітки та насипки з ПЦ, що описані поліномами 4-го ступеня методом найменших квадратів за умови досягнення максимального значення показника  $R^2$  для  $6 \div 12$  експериментальних точок кожного з 3-х експериментів для кожної їх конфігурації. Результати дослідження ПММ ФЕ обраної конструкції (вар. 4 на рис. 1) і елементів його конструкції (їх представлено на рис. 4) використані для адаптації й ідентифікації математичної моделі процесу руху ВГ дизеля у модулі ФЕ.

Результати дослідження дозволили визначити, що у конструкції модуля ФЕ можливо відмовитись від круглих отворів діаметром  $1$  мм у кількості  $20$  і більше на одне місце сполучення його порожнин, замінивши їх отворами у вигляді шпонкового пазу зонайбільшого перетину, закритими з обох сторін касетами зі сталеві сітки як більш технологічним технічним рішенням за рівноцінного гідравлічного опору.

Застосування щільності насипки сітчастих касет ПЦ, відмінної від  $100\%$  за об'ємом, недостатньо зменшує гідравлічний опір модуля ФЕ при потенційно суттєвому зниженні ефективності очищення ВГ. Зазор  $0 \div 3,5$  мм між двома шарами сітки у пакеті призводить до появи додаткового суттєвого за величиною опору, що має враховуватися у конструкціях модуля зі сполучною пластинною (вар. 3 та 4 на рис. 1).

Таким чином, дослідження на БДУ дозволили обрати варіанти конструкції модуля ФЕ (вар. 3 та 5 на рис. 1), що мають досліджуватись розрахунково та експериментально у складі

випускної системи дизеля 2Ч10,5/12 при його випробуваннях за стандартизованими циклами, а також отримати дані для адаптації та ідентифікації математичної моделі процесів у модулі.

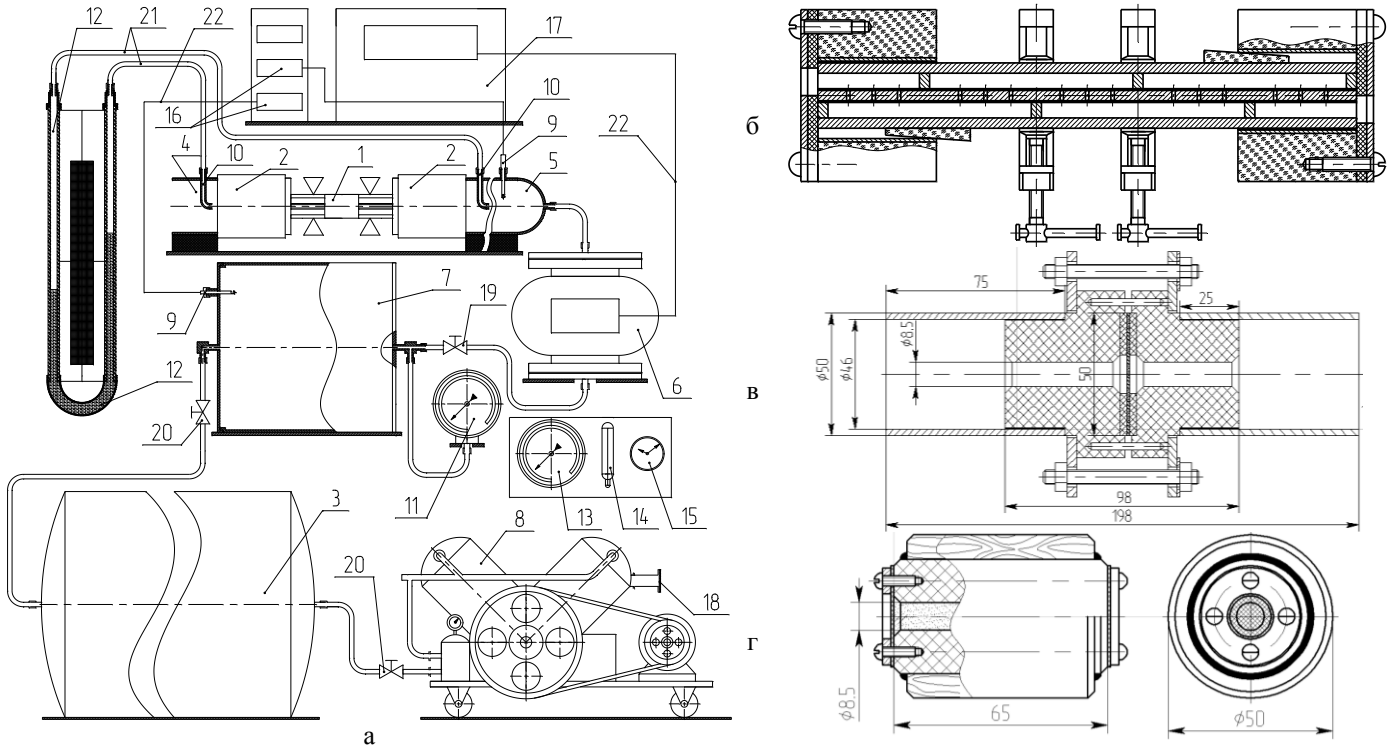


Рис. 3. Безмоторна дослідницька установка (а) та експериментальні зразки ФЕ:

1 – експериментальний зразок (б – ПММ ФЕ; в – тримач сіток; г – тримач насипки); 2 – елементи ущільнення об'єкту експерименту; 3 – ресивер (20 дм<sup>3</sup>); 4, 5 – вхідний та вихідний патрубки; 6 – лічильник газу РГ-40; 7 – вимірювальний ресивер (2,0 дм<sup>3</sup>); 8 – компресор поршневий 1132-2В2У4; 9 – перетворювач термоелектричний ТХК; 10 – зонди повного тиску; 11 – манометр стрілковий МО; 12 – диференційний манометр ДМ; 13 – барометр-анероїд БАММ-1М; 14 – термометр ртутний ТЛ-4; 15 – секундомір СОСпр-2б-2; 16 – прилад А565; 17 – частотомір-хронограф Ф5080; 18 – повітряний фільтр; 19 – регульовальний кран; 20 – крани; 21 – трубопровід; 22 – провід

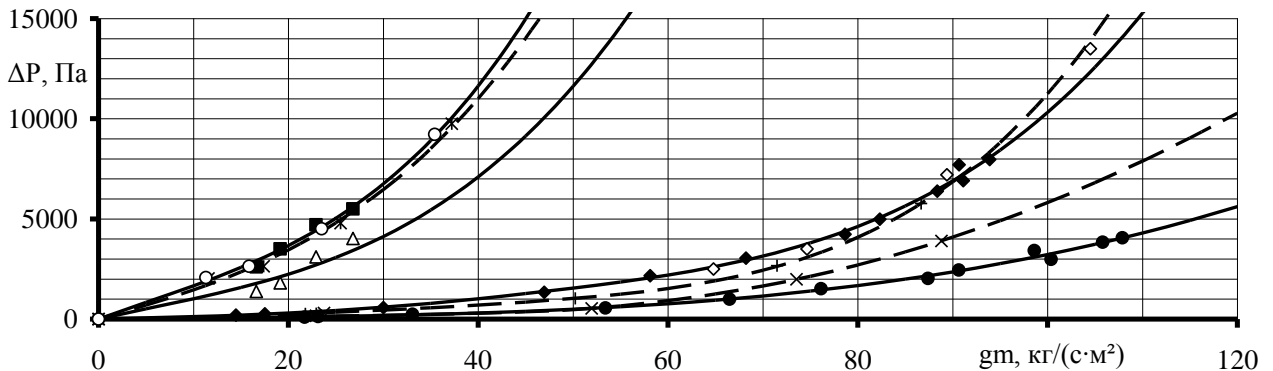


Рис. 4. Результати дослідження ПММ ФЕ та його складових на БДУ:

■ – ДМЦ ФЕ на МВС, встановлений безпосередньо за випускним колектором дизеля 2Ч10,5/12; ○ – ПММ ФЕ з насипкою з ПЦ у сітчастих касетах; ● – ПММ ФЕ без ПТ; ◆ – ПММ ФЕ без насипки з ПЦ у сітчастих касетах; ◇ – ДМ ФЕ на МВС; Δ – ДМЦ ФЕ на МВС, встановлений на відстані 5 м від випускного колектора дизеля; × – ПТ №1 (1 шар сітки) –  $\Delta P_{ПТ1}$ ; + – ПТ №2 (2 шари сітки із зазором 1 мм) –  $\Delta P_{ПТ2}$ ; \* – ПТ №3 (насіпка з природного цеоліту) –  $\Delta P_{ПТ3}$

**Третій розділ** містить відомості щодо математичного моделювання процесів, що відбуваються у ФЕ. Відомі з фахової літератури підходи до проектування пристроїв для очищення аерозолів від їх дисперсних фаз, а також методи прогнозування і визначення їх робочих характеристик не враховують специфіки роботи в умовах системи випуску дизелів. Сутність спеціальних методів, за допомогою яких таку специфіку можливо врахувати, складає комерційну таємницю фірм-виробників ФТЧ. Чисельне дослідження проведено для виявлення особливостей функціонування і обґрунтування вибору конфігурації модуля ФЕ, створення основ для проведення подальших розрахункових пошукових та оптимізаційних досліджень.

Моделювання здійснювалось у середовищі ліцензійної версії програмного комплексу COSMOS FloWorks (CFW). Математична модель руху ідеального газу являє собою систему рівнянь



Нав'є-Стокса у тривимірній нестационарній постановці та передбачає дискретизацію їх рішення у часі методом розщеплення операторів і у просторі методом кінцевих об'ємів за допомогою розрахункової сітки, що є ортогональною та адаптивною, а також використовує  $k-\epsilon$  модель турбулентності. При побудові конфігурацій об'єктів дослідження для моделювання наявності у них пористих тіл використовується континуальний метод фіктивних областей; при моделюванні руху ТЧ аерозолі – метод взаємопроникних континуумів. Тип задачі, яку розв'язували – тривимірною стаціонарною внутрішньою.

При чисельних дослідженнях одного модуля ФЕ використана властивість симетрії його конфігурації і тому розрахункова область вміщувала її половину. Розрахункова схема модуля ФЕ (рис. 5) відповідає конструкції модулів макетних зразків ФЕ для БДУ та МВС (вар. 4 на рис. 1). Сітчасті касети у місцях, де вони проникні для потоку ВГ, моделюються як ПТ з ізотропною проникністю для запобігання зайвого подрібнення розрахункової сітки – це ПТ 1-го типу (1 шар сітки) у кількості 2-х на модуль та ПТ 2-го типу (2 шари сітки із зазором 1,0 мм між ними) у кількості 3-х на модуль. Оскільки CFW не має інструментів для геометричного моделювання насипок, порожнини, заповнені насипкою з ПЦ, також моделюються як ПТ з ізотропною проникністю – це ПТ 3-го типу у кількості 4-х на модуль. Сітчасті касети у місцях, де вони є непроникними для потоку ВГ, замінено сталевим листовим прокатом відповідної товщини з шорсткістю поверхні Rz 250 мкм. Поверхні кожухів модуля, що є не вкритими сіткою, мають шорсткість поверхні Rz 80 мкм, бо повинні піддаватися піскоструминній обробці. Також конфігурація модуля ФЕ доповнена буферними об'ємами на вході та виході потоку ВГ для імітації наявності корпусу ФТЧ.

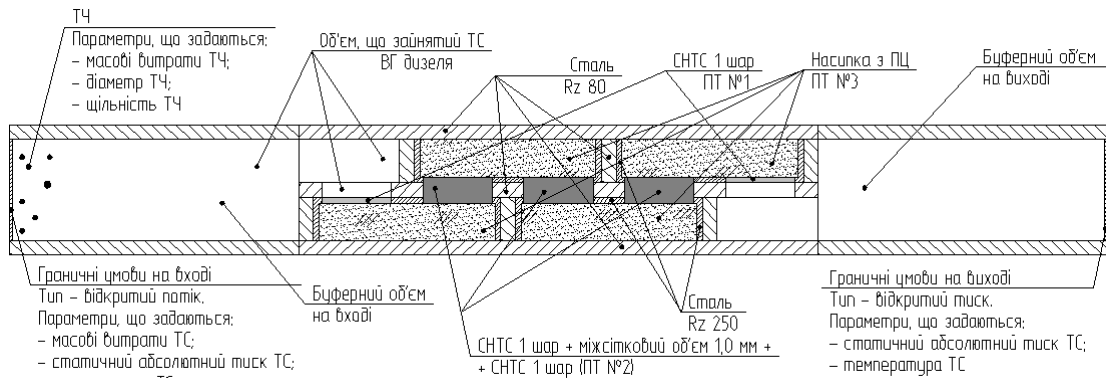


Рис. 5. Розрахункова схема модуля ФЕ

Для підвищення точності математичного моделювання "Інженерну базу даних" (ІБД) CFW доповнено новими видами матеріалів: ТС (аерозоль "ВГ дизеля – ТЧ"), матеріалами модулю ФЕ (СНТС, ПЦ) та даними щодо їх фізичних властивостей, а також параметрами, що характеризують ПТ (див. формулу (1)), які отримані з довідкової літератури та експериментально на БДУ та МВС.

Вплив ПТ на параметри руху ТС у CFW моделюється як розосереджений гідравлічний опір, величина якого за характерними напрямками проникності ПТ визначається параметрами потоку ТС та залежить від властивостей самого ПТ, що характеризуються ефективною пористістю ПТ (прийнята для всіх ПТ 50 %) та вектором сили опору ПТ, що визначається коефіцієнтом проникності за формулою

$$k = \Delta P \cdot S / (G_m \cdot L) \leq 100 \cdot V / x, \text{ c}^{-1}, \quad (1)$$

де  $\Delta P$  – перепад тисків між протилежними сторонами ПТ у даному напрямку, Па;  $G_m$  – масові витрати ТС крізь ПТ у даному напрямку, кг/с;  $S$  та  $L$  – відповідно площа поперечного перетину ПТ та довжина шляху ТС у ньому у даному напрямку,  $\text{m}^2$  і м;  $V$  – швидкість потоку ТС, м/с;  $x$  – максимальний розмір комірки розрахункової сітки, м. Величина  $k$  задається залежністю  $\Delta P = f(G_m)$  та константами  $S$  і  $L$ .

Чисельний розрахунок виконувався для п'яти режимів зовнішньої швидкісної характеристики дизеля 2Ч10,5/12. У даному дослідженні дизель 2Ч10,5/12 розглядався як генератор аерозолі із сталими у часі для кожного з режимів параметрами. У якості крайових умов обрано параметри аерозолі "ВГ дизеля – ТЧ", що експериментально отримані для діючих макетних зразків ФЕ на МВС. Для отримання їх уточнених значень проведено розрахункове дослідження ГО місць вста-

новлення ПММ та ДМЦ ФЕ у CFW, яке показало, що цей параметр становить в середньому близько 2,4 % від ГО ДМЦ ФЕ та близько 9,5 % від ГО ПММ ФЕ. Тип взаємодії потоку ТС зі стінками конфігурації – прилипання, взаємодії ТЧ аерозолію з ними – ідеальне відбиття. При розрахунках використано підхід до ГО модуля  $\Delta P_{\text{ДМЦ}}$  як до адитивної величини. Тобто, цей параметр розраховувався у п'ять етапів: 1 – розрахунок ГО проточної частини конфігурації модуля ФЕ із усіма "погашеними" (виключеними з розрахунку) ПТ  $\Delta P_{\text{БПТ}}$ ; 2 ÷ 4 – розрахунок її ГО із усіма "погашеними" ПТ, окрім одного ПТ 1-го, 2-го чи 3-го типу відповідно:  $\Delta P_{\text{БПТ+ПТ1}}$ ,  $\Delta P_{\text{БПТ+ПТ2}}$ ,  $\Delta P_{\text{БПТ+ПТ3}}$ ; 5) розрахунок ГО модуля за формулою

$$\Delta P_{\text{ДМЦ}} = \Delta P_{\text{БПТ}} + 2 \cdot \Delta P_{\text{ПТ1}} + 3 \cdot \Delta P_{\text{ПТ2}} + 4 \cdot \Delta P_{\text{ПТ3}} = \Delta P_{\text{БПТ}} + 2 \cdot (\Delta P_{\text{БПТ+ПТ1}} - \Delta P_{\text{БПТ}}) + 3 \cdot (\Delta P_{\text{БПТ+ПТ2}} - \Delta P_{\text{БПТ}}) + 4 \cdot (\Delta P_{\text{БПТ+ПТ3}} - \Delta P_{\text{БПТ}}), \text{ Па.} \quad (2)$$

Для перевірки отриманих за формулою (2) результатів, виконано розрахунок ГО модуля ФЕ із усіма "непогашеними" ПТ для режиму максимального крутного моменту дизеля  $\Delta P_{\text{ДМЦ}}$ , як режиму з максимальним викидом ТЧ. Чисельні результати на 6,5 % перевищують експериментально отримані (похибка математичного моделювання), що з урахуванням похибок розрахунку (сіткової сходимості – 9 %) та прямого вимірювання цієї величини на МВС (4,5 %), зумовлює похибку вирішення інженерної задачі 20 %. Для досягнення сіткової сходимості усі розрахунки проводились на максимально дрібній розрахунковій сітці з тих, що встановлюються автоматичними налаштуваннями (при розрахунку  $\Delta P_{\text{ДМЦ}}$ , наприклад, розрахункова сітка містила: приблизно 33 тис. комірок "тврдого тіла", 134 тис. комірки ТС та 82 тис. "часткових" комірок), при цьому розміри розрахункових комірок змінювались по конфігурації від 0,125 до 0,85 мм. У якості критерію завершення розрахунку обрано сходимість масових витрат ТС  $G_m$  крізь модуль як цілі розрахунку (критерій сходимості цілі – точність непрямого одноразового вимірювання цього параметру на МВС). При розрахунку на ЕОМ, обладнаному процесором Intel Pentium IV з тактовою частотою 2,4 ГГц та оперативною пам'яттю DDR з об'ємом 1 Гб, для встановлення цілі знадобилося 750 ÷ 920 ітерацій та 2,5 ÷ 5,5 годин для різних етапів розрахунку для кожного з режимів роботи дизеля, а також 27 годин для розрахунку величини  $\Delta P_{\text{ДМЦ}}$ . Теплообмін ТС з деталями модуля та радіаційний теплообмін не враховувалися.

В результаті розрахунку отримано траєкторії ліній руху потоку ВГ та розподіл вздовж них статичного тиску. Для варіанту розрахунку з усіма "непогашеними" ПТ на режимі максимального крутного моменту дизеля їх подано на рис. 6.

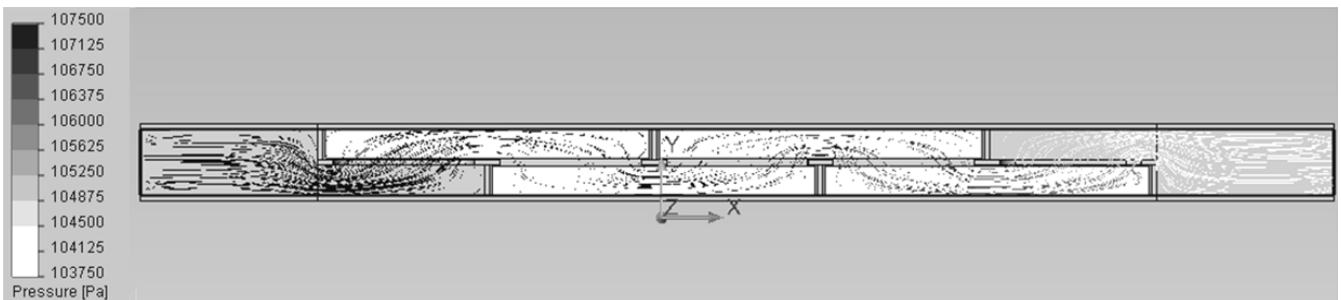


Рис. 6. Траєкторії руху потоку ВГ у модулі ФЕ

На рис. 7 представлено: результати розрахунку ГО окремих складових формули (2) ( $\Delta P_{\text{БПТ}}$ ,  $\Delta P_{\text{БПТ+ПТ1}}$ ,  $\Delta P_{\text{БПТ+ПТ2}}$ ,  $\Delta P_{\text{БПТ+ПТ3}}$  та  $\Delta P_{\text{ДМЦ}}$ ) у CFW; результати розрахунку ГО модуля  $\Delta P_{\text{ДМЦ}}$  за формулою (2); результати експериментального визначення ГО модуля такої ж конструкції та його елементів конструкції на БДУ ( $\Delta P_{\text{БПТ}}$ ,  $\Delta P_{\text{ПТ1}}$ ,  $\Delta P_{\text{ПТ2}}$ ,  $\Delta P_{\text{ПТ3}}$  та  $\Delta P_{\text{ПММ}}$ ) та на МВС ( $\Delta P_{\text{ДМЦ}}$ ); результати розрахунку ГО модуля за формулою (2)  $\Delta P_{\text{ДМЦ}}$  для експериментальних даних.

Як впливає з порівняння експериментальних даних (рис. 4 і 7), рух ТС крізь ПТ усіх типів має наступні особливості. Потік ТС крізь ПТ 1-го та 2-го типів характеризується у 2,5 рази меншим значенням  $g_m$ , оскільки йому надається уся площа шпонкоподібного отвору у сполучній пластині, при цьому площа на вході у модуль складає 40 % від неї. Шлях потоку ТС крізь ПТ 3-го типу проходить не через увесь об'єм ПТ, а являє собою сектор еліптичного циліндра та змінює при цьому напрям на 180 град., спочатку поступово зменшуючи прохідний перетин у 2,5 рази, а потім збільшуючи його до попередніх розмірів. Шлях потоку розбито на сектори та перетворити на

призми, висота та ширина яких відповідають величинам  $S$  і  $L$  у формулі (1). Тому ГО ПТ 3-го типу складає близько 17,5 % від опору цеолітової комірки (рис. 3,г).

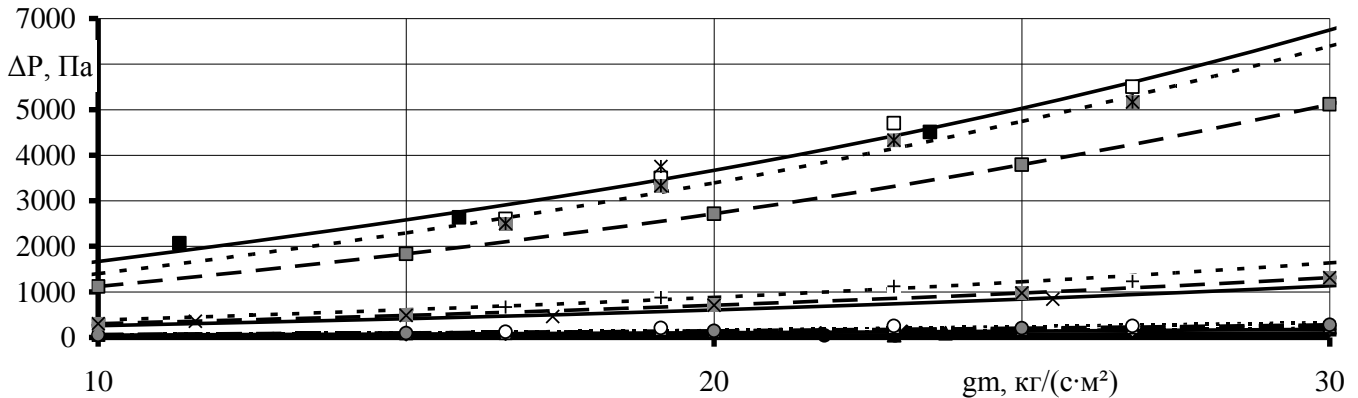


Рис. 7. Результати розрахункового дослідження гідралічного опору ДМЦ ФЕ:

- –  $\Delta P_{ПММ}$  (отримано експериментально на БДУ для ПММ); □ –  $\Delta P_{ДМЦ}$  (отримано експериментально на МВС для ДМЦ);
- –  $\Delta P_{ДМЦ}$  (отримано розрахунком по формулі (2) для експериментальних даних для ПММ, отриманих на БДУ);
- \* –  $\Delta P_{ПТ}$  (отримано одноразово розрахунком у CFW для ДМЦ із всіма «непогашеними» ПТ); \* –  $\Delta P_{ДМЦ}$  (отримано розрахунком по формулі (2) для результатів розрахунку її складових у CFW для ДМЦ);
- ◆, ▲, ●, × – величини  $\Delta P_{ПТ1}$ ,  $\Delta P_{ПТ2}$  і  $\Delta P_{ПТ3}$  відповідно (отримано експериментально на БДУ); ◆, ▲, ●, × – величини  $\Delta P_{ПТ1}$ ,  $\Delta P_{ПТ2}$ ,  $\Delta P_{ПТ3}$  відповідно (отримано експериментально на БДУ для ПММ); ◆, ▲, ●, × – величини  $\Delta P_{ПТ1}$ ,  $\Delta P_{ПТ2}$ ,  $\Delta P_{ПТ3}$  відповідно (отримано розрахунком у CFW для ДМЦ)

У результаті чисельного дослідження встановлено, що основну частину гідралічного опору (71,5 %) модуля ФЕ з сітчастими касетами та насипкою з ПЦ у них  $\Delta P_{ДМЦ}$  становить насипка ( $4 \cdot \Delta P_{ПТ3}$ ), а опором проточної частини конфігурації модуля без ПТ  $\Delta P_{ПТ}$  (3 %) та сітчастих касет ( $2 \cdot \Delta P_{ПТ1}$  та  $3 \cdot \Delta P_{ПТ2}$  – у сумі не перевищують 4,5 %) можливо знехтувати. Доданки формули (2), отримані розрахунком за нею ( $\Delta P_{ДМЦ}$ ,  $\Delta P_{ПТ+ПТ1}$ ,  $\Delta P_{ПТ+ПТ2}$ ,  $\Delta P_{ПТ+ПТ3}$ ) для результатів експериментального визначення опору модуля та його елементів конструкції ( $\Delta P_{ПТ}$ ,  $\Delta P_{ПТ1}$ ,  $\Delta P_{ПТ2}$ ,  $\Delta P_{ПТ3}$ ), складають в середньому 67,7 % від відповідних величин, отриманих розрахунком при математичному моделюванні. Таким чином, ефект взаємного впливу ПТ на параметри потоку ВГ, опір, пов'язаний з вихоровим рухом потоку у деяких зонах модуля та інші невраховані у розрахунку фактори (прийняті як припущення) можуть складати до третини опору модуля. Таке порівняння для величини  $\Delta P_{ДМЦ}$ , отриманої розрахунком за формулою (2) для даних, отриманих розрахунком у CFW та експериментально на МВС, дає можливість припустити, що неврахування теплообміну між ТС та деталями модуля, різниці у реальних значеннях шорсткості поверхонь деталей модуля, можливого витоку ВГ у нещільності повз зразок, що експериментально досліджується, та неминучого засмічення ФЕ під час роботи може чинити вплив на результат розрахунку опору модуля на величину до 15,5 %.

У CFW при моделюванні руху двофазних потоків (аерозолів) приймається, що частинки твердої чи рідкої фази при їх масовій концентрації, меншій ніж 30 %, на параметри потоку не впливають. Також приймається, що на поверхнях ПТ отримати кількісну оцінку та картини розподілу адсорбованих ТЧ неможливо.

Таким чином, результати чисельного дослідження показали задовільне узгодження з результатами експериментальних досліджень діючих макетних зразків ФЕ на БДУ та МВС, дозволили виявити та описати особливості функціонування модуля, а також обґрунтувати вибір його конструкції. Наведені дані свідчать про коректність виконаного моделювання процесу руху аерозолу "ВГ дизеля – ТЧ" у модулі.

У **четвертому розділі** наведено дані, що стосуються експериментальних досліджень діючих макетних зразків ФЕ на моторному випробувальному стенді. На МВС відділу поршневих енергоустановок ІПМаш НАНУ встановлено автотракторний безнаддувний двоциліндровий чотиритактний двоклапаний дизель повітряного охолодження Д21А1 (2Ч10,5/12) з нерозділеною камерою згоряння у поршні та одноплунжерним ПНВТ розподільного типу, з робочим об'ємом 2,0 дм<sup>3</sup> та номінальною потужністю 21,3 кВт, виробництва Володимирського тракторного заводу.

Для забезпечення можливості проведення експериментального дослідження робочих характеристик діючих макетних зразків розробленого ФЕ, уточнення значень граничних умов та отримання даних для адаптації й ідентифікації математичної моделі процесів у модулі ФЕ, здійснено

модернізацію систем МВС: випускної і відбору проб ВГ на токсичність, схему та зовнішній вигляд якої наведено на рис. 8,а. Оцінено похибки прямих та непрямих одноразових вимірювань всіх параметрів, що вимірюються на МВС, їх значення не перевищують нормативно встановлені.

Розроблено та виготовлено зразки для проведення експерименту – діючі макети ФЕ із сітчастими касетами без (ДМ ФЕ) та з насипкою з ПЦ у них (ДМЦ ФЕ) (див. рис. 8,б і в), що складаються з 4 і 20 модулів й двох ущільнюючих шторок та реалізують конструктивні особливості модуля обраних конструкцій (див. вар. 3 і 5 на рис. 1, рис. 2). При експериментальних дослідженнях за розробленою методикою зразки встановлювалися у спеціальний герметичний тримач, що розміщувався у вертикальному положенні (для ущільнення насипки з ПЦ під власною вагою).

Характер розподілу ТЧ на поверхнях сітчастих касет та гранул ПЦ (див. рис. 8,г,д) підтверджує, що розроблений ФЕ реалізує комбінований принцип роботи.

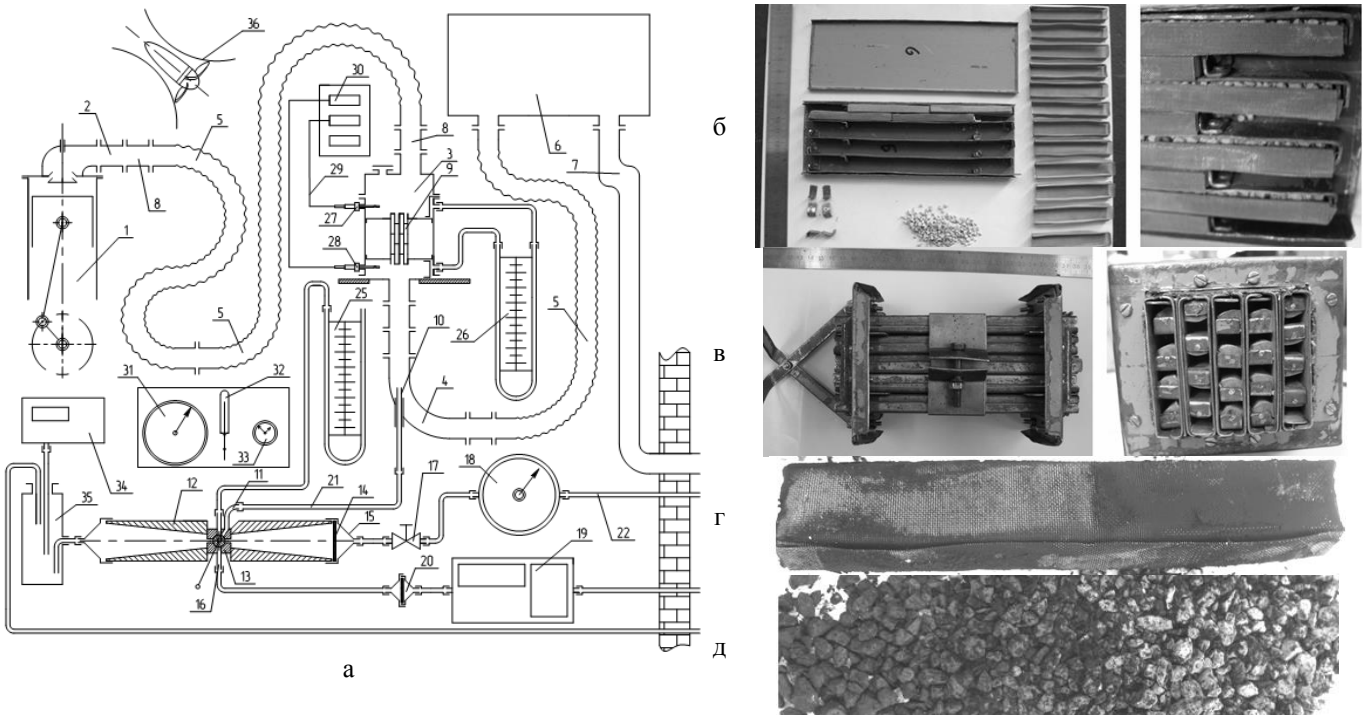


Рис. 8. Схема системи відбору проб ВГ МВС діючий макет ФЕ:

а – схема МВС; б – конструкція ДМЦ; в – зовнішній вигляд ДМЦ до випробувань; г і д – сітчаста касета і насипка з ПЦ після випробувань. Для а: 1 – дизель 2Ч10,5/12; 2 – випускний колектор дизеля; 3 – макетоутримуюча вставка; 4 – кутовий газопровід; 5 – гнучкий газопровід; 6 – глушник шуму; 7 – газовивідна труба; 8 – тримач макета ФТЧ; 9 – макет ФТЧ; 10 – пробовідбірний зонд; 11, 12, 13, 15, 16 – відповідно вхідний штуцер, конус, чотирьохходовий кран, ковпак та вихідний штуцер алонжа; 14 – змінний тефлоновий фільтр; 17 – регулюючий кран; 18 – витратомір газу ГСБ-400; 19 – п'ятикомпонентний газоаналізатор Автотест-02.03П; 20 – захисний фільтр з тримачем; 21 – з'єднувальний трубопровід; 22, 23, 24 – вивідні трубопроводи; 25, 26 – дифманометри ДМ; 27, 28 – датчики термометричні ТХА; 29 – провід; 30 – прилад ОВЕН ТРМ 200; 31 – барометр aneroid БАММ-1М; 32 – термометр ртутний ТЛ-4; 33 – секундомір СОСпр-26-2; 34 – димомір ИНФРАКАР-Д, 35 –вимірювальний ресивер (6,36 дм<sup>3</sup>); 36 – повітродувка

Ефективність очищення ВГ дизеля від ТЧ фільтром визначається відповідним коефіцієнтом за формулою

$$K_{EO} = (G_{TЧДВЗ} - G_{TЧФТЧ}) / G_{TЧДВЗ} \cdot 100, \% \quad (3)$$

де  $G_{TЧФТЧ}$  і  $G_{TЧДВЗ}$  – відповідно масовий викид ТЧ з ВГ дизеля на певному режимі роботи із встановленим у його випускній системі ФТЧ і без нього, кг/год.

Ці величини розраховуються за залежністю, запропонованою проф. І.В. Парсадановим для автотракторних дизелів

$$G_{TЧ} = (2,3 \cdot 10^{-3} \cdot N_D + 5 \cdot 10^{-5} \cdot N_D^2 + 0,145 \cdot \frac{C_{CH} \cdot 4,78 \cdot 10^{-7} \cdot (G_{нов} + G_{нал})}{0,7734 \cdot G_{нов} + 0,7239 \cdot G_{нал}})$$

$$+0,33 \cdot \left( \frac{C_{CH} \cdot 4,78 \cdot 10^{-7} \cdot (G_{нов} + G_{нал})}{0,7734 \cdot G_{нов} + 0,7239 \cdot G_{нал}} \right)^2 \cdot \frac{(0,7734 \cdot G_{нов} + 0,7239 \cdot G_{нал})}{1000}, \quad \text{кг/год, (4)}$$

де  $N_D$  – коефіцієнт ослаблення світлового потоку, %;  $C_{CH}$  – об'ємна концентрація  $CH_x$  у ВГ,  $\text{млн}^{-1}$ ;  $G_{нов}$  і  $G_{нал}$  – часові витрати повітря і палива дизелем у  $\text{кг/год}$ .

Результати I етапу дослідження (порівняльного для ДМ і ДМЦ ФЕ) – зовнішні швидкісні і витратні характеристики – свідчать про те, що ДМЦ має суттєву перевагу над ДМ за ефективністю очищення ВГ від ТЧ як у кількісному, так і у якісному плані, проте поступається за масогабаритними та вартісними показниками за рівноцінного ГО. Максимальний ступінь очищення спостерігається на режимі максимального крутного моменту та залежить від температури ВГ на вході у ФЕ  $t_{ФТЧвх}$ . Така залежність зумовлена впливом температури ВГ на хід процесів конденсації продуктів неповного згоряння палива (ПНЗП –  $CH_x$ ) на твердих частинках і коагуляції самих ТЧ, що визначають розміри ТЧ. Подальші етапи дослідження проводились для ДМЦ.

Результати II етапу дослідження (впливу  $t_{ФТЧвх}$  на ГО і  $K_{EO}$  – див. рис. 9,в) – зовнішні швидкісні та витратні характеристики для різних місць встановлення ДМЦ вздовж довжини випускного тракту МВС  $L_{вип}$  – дозволили отримати відповідні коефіцієнти: компоновальний  $k_L$  (враховує зміну максимальної  $t_{ФТЧвх}$  у функції  $L_{вип}$ ) та температурний  $k_t$  (враховує зміну  $t_{ФТЧвх}$  по режимах зовнішньої швидкісної характеристики, спричинену зміною крутного моменту  $M_{кр}$ ). Зміна температури ВГ при цьому досягалась за рахунок подовження випускного тракту МВС при перенесенні місця встановлення зразка вздовж тракту від випускного колектора дизеля гнучкими жаростійкими газопроводами на відстані  $L_{вип}$  0, 1,5, 5 та 8 м.

За результатами II і III етапу дослідження (навантажувальні характеристики та характеристики холостого ходу для раціонального місця встановлення зразка із  $L_{вип}$  5 м) оцінено зниження середньоексплуатаційного викиду ТЧ автотракторним дизелем 2Ч10,5/12 за допомогою розробленого ФЕ для 13-ти (Правила ЄЕК ООН № 49) та 8-ми режимного (Правила ЄЕК ООН № 96) циклів. Воно склало 62,9 і 52,3 % відповідно. Це дозволяє перевести дизель на 1 щабель вище за відповідністю нормам токсичності ВГ EURO. При цьому збільшення питомих ефективних витрат палива вказаним дизелем через створення протитиску розробленим ФЕ у випускній системі, оцінене за тими ж циклами, складає 4,35 % (не перевищує 3,3 – 12,5  $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ ). Розподіл коефіцієнта ефективності ФЕ та підвищення часових витрат палива дизелем за режимами 13-режимного циклу приведено на рис. 10,а. За цими даними побудовано витратні характеристики ДМЦ (рис. 9,б), на яких також наведено межі діапазону зміни потоку ВГ  $g_m$ , що спостерігаються у випускному колекторі дизеля 2Ч10,5/12. Усі залежності описано методом лінійної регресії (див. розділ 3).

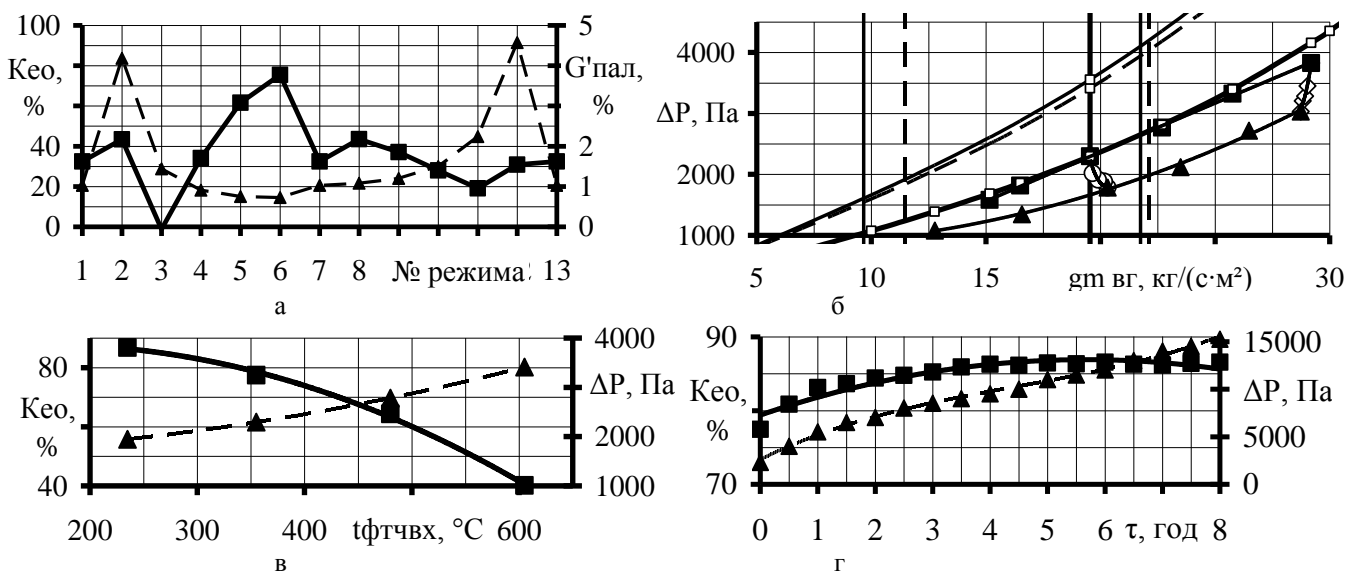


Рис. 9. Результати випробувань ДМЦ ФЕ

Для а: ■ –  $K_{EO}(G_{ТЧ})$ ; ▲ –  $\%G_{нал}$ . Для б характеристики: ■ – зовнішня швидкісна; ▲ – холостого ходу; ● – навантажувальна при  $n_{KB} = 1200 \text{ хв}^{-1}$ ; ◆ – навантажувальна при  $n_{KB} = 1800 \text{ хв}^{-1}$ . Для в і г: ■ –  $K_{EO}$ ; ▲ –  $\Delta P$

За результатами IV етапу дослідження (впливу часу роботи дизеля  $\tau$  на режимі максимального крутного моменту на ГО і  $K_{EO}$  зразка – див. рис. 9,г) – отримано відповідні часові коефіцієнти  $k_\tau$ . Виявлено, що за 8 годин дослідження (тривалість робочої зміни) гідравлічний опір ДМЦ ФЕ не лінійно зростало до величини 15 кПа (у незабрудненому стані не перевищує 4 кПа у всьому діапазоні робочих режимів дизеля), а  $K_{EO}$  асимптотично наблизився до значення 86,5 % (тобто збільшився на 12 %).

Для опису результатів дослідження запропоновано спосіб, згідно якого використовується витратна характеристика відповідної конфігурації ПММ, отримана на БДУ за постійної температури ТС (див. рис. 9,б). На БДУ моделюється потік ВГ з температурою, характерною для режиму максимального крутного моменту дизеля 2Ч10,5/12. При цьому потік ВГ  $g_m$  є функцією лише частоти обертання колінчастого валу дизеля  $n_{кв}$  та кількості модулів у ФЕ  $i_m$ . Узгодження витратної характеристики з даними, що експериментально отримані на МВС для ДМЦ (тобто урахування дії факторів, варіювання якими не передбачене конструкцією БДУ –  $t_{ФТЧ_{6x}}$ ,  $L_{вин}$  і  $\tau$ ), досягається шляхом введення коефіцієнтів – налаштувального  $k_0$  (отриманий за даними I етапу моторних досліджень та залежить від типу об'єкту дослідження),  $k_L$ ,  $k_t$  і  $k_\tau$ . Для гідравлічного опору та  $K_{EO}$  ДМЦ ФЕ, наприклад, описані цим методом залежності від рівноцінних комплексів факторів, що безпосередньо на них впливають –  $g_m$ ,  $t_{ФТЧ_{6xmax}}$ ,  $t_{ВГ}$ ,  $\tau$ , або  $n_{кв}$ ,  $i_m$ ,  $M_{кр}$ ,  $L_{вин}$  і  $\tau$ , мають вигляд формул (5) і (6).

$$\Delta P_{ФТЧ} = \Delta P_{ПММ} \cdot k_\Sigma = (0,122 \cdot g_{m\_ВГ}^3 - 1,964 \cdot g_{m\_ВГ}^2 + 173,7 \cdot g_{m\_ВГ}) \cdot k_\Sigma = \Delta P_{ПММ}(g_m) \times k_0 \cdot k_L(t_{ФТЧ_{6xmax}}) \cdot k_t(t_{ВГ}) \cdot k_\tau(\tau) = \Delta P_{ПММ}(n_{кв}, i_m) \cdot k_0 \cdot k_L(L_{вин}) \cdot k_t(M_{кр}) \cdot k_\tau(\tau), \text{ Па}; \quad (5)$$

$$K_{EO} = K_{EO_{зовниш}} \cdot k_\Sigma = K_{EO_{зовниш}} \cdot k_L(t_{ФТЧ_{6xmax}}) \cdot k_\tau(\tau) = (8,3 \cdot 10^{-8} \cdot n_{кв}^3 - 3,94 \cdot 10^{-4} \cdot n_{кв}^2 + 0,575 \cdot n_{кв} - 212,5) \cdot k_L(L_{вин}) \cdot k_\tau(\tau), \text{ \%}. \quad (6)$$

Таким чином, дослідженнями виявлено залежності характеристик роботи розробленого ФЕ від параметрів його конструкції, а також конструктивних і регулювальних параметрів дизеля 2Ч10,5/12.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена науково-практична задача поліпшення екологічних показників автотракторного дизеля за рахунок застосування очищення його ВГ від ТЧ фільтром твердих частинок оригінальної конструкції. Вирішення цієї задачі дозволило отримати наступні наукові та практичні результати:

1. Проаналізовано, узагальнено та систематизовано дані щодо конструкції, структури та способів функціонування систем та пристроїв очищення ВГ дизелів від ТЧ, а також запропоновано їх розширену класифікацію. Виявлено, що ФТЧ можуть не містити у своєму складі керамічних елементів та каталітичних покриттів, а їх регенерація може здійснюватися різноманітними методами та засобами.

2. Розроблено фільтруючий елемент модульної конструкції, що дозволяє побудувати на його основі типоряд ФТЧ для транспортних дизелів різної потужності (як нових, так і таких, що перебувають у експлуатації), а також для систем рециркуляції ВГ поршневих ДВЗ. Регенерація ФЕ можлива будь-яким з відомих способів. Розроблено схему і принцип роботи системи регенерації ФЕ, що містить плазмотрон, оцінено витрати енергії для її роботи. Розміщення розробленого ФТЧ на борту АТЗ можливе поза підкапотного простору. Обрано просту у виготовленні та обслуговуванні з невисокою собівартістю конструкцію модуля ФЕ без каталітичних покриттів, з комбінованим способом очищення ВГ дизелів від ТЧ, що передбачає комплексне використання інерційного впливу на ТЧ, процесів фільтрації і адсорбції та має значний потенціал покращення усіх показників роботи.

3. Розроблено безмоторну дослідницьку установку для експериментальних порівняльних досліджень гідравлічних характеристик макетних зразків модуля ФЕ та елементів його конструкції з масштабом поперекового перетину до 1:30 за незмінної температури текучого середовища, що вирізняється підвищеною безпекою проведення досліджень. Розроблено методику вибору раціональної конструкції модуля ФЕ, підготовки вихідних даних та отримання даних для адаптації та

ідентифікації математичної моделі процесу руху аерозолу "ВГ дизеля – ТЧ" у ФЕ.

4. Проведено порівняльні експериментальні дослідження гідравлічних характеристик макетних зразків модуля ФЕ та його структурних елементів на БДУ, які дозволили обрати найкращі варіанти конструкції модуля для подальшого розрахункового та експериментального дослідження робочих характеристик у складі випускної системи дизеля 2Ч10,5/12 при випробуваннях за стандартизованими циклами.

5. Проведено розрахункове дослідження процесу руху аерозолу "ВГ дизеля – ТЧ" у модулі ФЕ за допомогою математичної моделі руху ідеального газу програмного комплексу COSMOS FloWorks. Модель адаптовано до об'єкту дослідження шляхом доповнення її даними щодо властивостей аерозолу і матеріалів модуля, що взяті з довідкової літератури та отримані експериментально. Підхід до моделювання сталевих тканих сіток та насипок як пористих тіл, використання властивості симетрії конфігурації модуля, а також розрахунок гідравлічного опору як адитивної величини, дозволили зменшити час розрахунку. Результати розрахункового дослідження показали задовільне узгодження з результатами експериментальних досліджень діючих макетних зразків ФЕ на БДУ та МВС, дозволили виявити та описати особливості функціонування модуля, а також обґрунтувати вибір його конструкції.

6. Модернізовано системи випуску та відбору проб ВГ на токсичність випробувального стенду з дизелем 2Ч10,5/12. Проведено експериментальні дослідження робочих характеристик діючих макетних зразків ФЕ на МВС за розробленою методикою. За результатами досліджень остаточно обрано конструкцію модуля ФЕ, для якої отримано витратні характеристики, а також виявлено залежності його гідравлічного опору та ефективності очищення ВГ дизеля від ТЧ від режимних та конструктивних параметрів дизеля. Максимальна ефективність очищення ВГ дизеля від ТЧ розробленим ФЕ спостерігається на режимі максимального крутного моменту та складає 77,4 % (а впродовж однієї робочої зміни зростає до 86,5 %), що дозволяє знизити середньоексплуатаційний викид ТЧ з ВГ дизеля 2Ч10,5/12, оцінений для 13-ти та 8-ми режимних випробувальних циклів, на 62,9 та 52,3 % (це дозволяє перевести дизель на 1 щабель вище за відповідністю нормам токсичності ВГ EURO). При цьому питомі ефективні витрати палива дизелем збільшуються лише на 4,35 %. Його гідравлічний опір у незабрудненому стані не перевищує 4 кПа в усьому діапазоні робочих режимів дизеля і 15 кПа впродовж однієї робочої зміни. ФЕ для дизеля з робочим об'ємом 2,0 дм<sup>3</sup> містить не менше 30 модулів та важить 2,0 кг, його габаритні розміри складають 60 × 90 × 170 мм, ці показники не перевищують показників аналогів. Вартість матеріалів для одного модуля ФЕ наразі не перевищує 2,0 грн.

7. Розроблено рекомендації щодо застосування результатів дисертаційного дослідження. Результати наукового дослідження впроваджені та використовуються у відділі поршневіх енергоустановок ІПМаш НАН України (м. Харків), а також в навчальному процесі на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння НТУ "ХП" при підготовці студентів. Розроблений робочий зразок фільтра використовується для очищення ВГ при гарячій обкатці відремонтованих транспортних дизелів на ПП "АВТОТРАНС-Т" (м. Балаклея).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кондратенко О.М. Современные методы очистки отработавших газов дизелей от твердых частиц / О.П. Строков, О.М. Кондратенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 2. – С. 99 – 104. *Здобувач виконав літературно-патентний пошук за темою дисертації, обґрунтував її актуальність, запропонував класифікацію засобів очищення ВГ дизелів від ТЧ та нову конструкцію ФТЧ дизеля.*

2. Кондратенко О.М. Расчетная оценка гидравлического сопротивления модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля. Часть 1 / О.П. Строков, О.М. Кондратенко // Автомобильный транспорт. – 2011. Вип. 28. – С. 48 – 54. *Здобувач обґрунтував основні конструктивні параметри модуля ФЕ та виконав розрахункове порівняльне дослідження ГО різних варіантів його конструкції.*

3. Кондратенко О.М. Расчетная оценка гидравлического сопротивления модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля. Часть 2 / О.П. Строков, О.М. Кондратенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – № 2. – С. 86 – 90. *Здобувач виконав розрахункове порівняльне дослідження ГО нових конфігурацій модуля ФЕ.*

4. Кондратенко О.М. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления макета модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля / О.П. Строков, О.М. Кондратенко // Автомобільний транспорт. – 2011. Вип. 29. – С. 144 – 147. *Здобувач розробив та виготовив ПММ ФЕ та безмоторну дослідницьку установку.*

5. Кондратенко О.М. Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 1: модернизация конструкции фильтра и дополнение базы данных по свойствам пористого тела / О.М. Кондратенко, О.П. Строков, А.М. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 1. – С. 82 – 88. *Здобувач розробив модернізовану конструкцію модуля ФЕ ФТЧ дизеля, розробив та виготовив об'єкти дослідження для БДУ, розробив методику та провів експериментальне дослідження їх ГО на БДУ.*

6. Кондратенко О.М. Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 2: дополнение баз данных по свойствам материалов фильтра и рабочего тела, определение значений краевых условий / О.М. Кондратенко, О.П. Строков, В.М. Семикін // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 87 – 92. *Здобувач брав участь у модернізації системи відбору проб ВГ МВС та доповнив ІБД програмного комплексу COSMOS FloWorks даними щодо властивостей матеріалів модуля ФЕ і ТС, отриманих з довідкової літератури та експериментально.*

7. Кондратенко О.М. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления макета модуля фильтра твердых частиц быстроходного дизеля. Часть 2 / О.П. Строков, О.М. Кондратенко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2012. – № 19. – С. 121 – 128. *Здобувач розробив методику та провів експериментальне дослідження ГО різних конструкцій ПММ ФЕ на БДУ.*

8. Кондратенко О.М. Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Часть 3: вопросы использования цеолита в конструкции фильтрующего элемента / О.М. Кондратенко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2012. – № 60 (966). – С. 83 – 89.

9. Кондратенко О.М. Моделирование тепло- та масообмінних процесів у фільтрі твердих частинок дизеля. Частина 4: розрахункове дослідження робочих характеристик фільтра / О.М. Кондратенко, О.П. Строков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2013. – № 5 (979). – С. 100 – 109. *Здобувач провів розрахункове дослідження процесу руху аерозолу «ВГ дизеля – ТЧ» у модулі ДМ ФЕ.*

10. Кондратенко О.М. Вдосконалення методів очищення відпрацьованих газів дизелів від твердих часток / О.М. Кондратенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII Міжнар. науково-практич. конф., 12 – 14 травня 2010 р.: тези доп., Ч.І. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – С. 202.

11. Кондратенко О.М. Экспериментальное определение параметров отработавших газов дизеля 2Ч10,5/12 после модернизации моторного испытательного стенда./ О.М. Кондратенко // Сучасні проблеми машинобудування. Конф. молодих вчених та спеціалістів ІПМаш НАН України, 8 – 11 листопада 2011 р.: тези доп. – Харків: ІПМаш, 2011. – С. 53.

12. Кондратенко О.М. Моделирование тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. Уточнение базы данных по свойствам пористых тел. / О.М. Кондратенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XX Міжнар. науково-практич. конф., 01 – 03 травня 2012 р.: тези доп., Ч.І. – Харків, НТУ "ХПІ", 2012. – С. 175.

13. Кондратенко О.М. Экспериментальное определение характеристик пористых тел, необходимых для моделирования тепло- и массообменных процессов в фильтре твердых частиц дизеля. / О.М. Кондратенко // Сучасні проблеми машинобудування. Конф. молодих вчених та спеціалістів ІПМаш НАН України, 7 – 11 листопада 2012 р.: тези доп. – Харків: ІПМаш, 2012. – С. 55.

## АНОТАЦІЇ

**Кондратенко О.М. Зниження викиду твердих частинок транспортних дизелів, що перебувають в експлуатації.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2013.



Дисертацію присвячено поліпшенню екологічних показників дизельних ДВЗ, шляхом очищення їх відпрацьованих газів від твердих частинок розробленим фільтром твердих частинок з фільтруючим елементом оригінальної конструкції.

Розроблено ФТЧ дизеля модульної конструкції, ФЕ якого не містить каталітичних покриттів (фільтр має бути нечутливим до використання неякісних моторних палив та мастил) та виготовлено з недефіцитних матеріалів вітчизняного виробництва, що мають малу вартість (наразі для одного модуля ФЕ складає 2,0 грн.). Також ФЕ характеризується прийнятним гідравлічним опором (у незабрудненому стані – до 4 кПа у всьому діапазоні робочих режимів дизеля і до 15 кПа впродовж 8-годинної робочої зміни), високою технологічністю виробництва та таким ступенем очищення ВГ дизеля від ТЧ, що дозволяє знизити середньоексплуатаційний викид ТЧ з ВГ дизеля 2Ч10,5/12, оцінений для 13-ти та 8-ми режимних випробувальних циклів на 62,9 та 52,3 % (це дозволяє привести дизель у відповідність до вимог наступного рівня норм токсичності ВГ EURO). При цьому питомі ефективні витрати палива дизелем збільшуються лише на 4,35 %. Застосування у конструкції ФЕ насипки з середньофракційного природного цеоліту, брикетованої у касетах зі сталевіої нержавіючої тканіої сітки, має сприяти підвищенню експлуатаційної надійності фільтра за рахунок відсутності схильності до термошокового руйнування його матеріалів. ФЕ для дизеля з робочим об'ємом 2,0 дм<sup>3</sup>, що містить не менше 30 модулів, важить 2,0 кг при габаритних розмірах 60 × 90 × 170 мм, ці показники не перевищують показників аналогів. Модульна конструкція фільтра дозволяє побудувати на його основі типоряд ФТЧ для транспортних дизелів різної потужності. Регенерація фільтру можлива будь-яким з відомих методів. Розроблено схему і принцип роботи системи регенерації ФЕ, що містить плазмотрон, оцінено витрати енергії для її роботи. Можливим є, за певних умов, використання розробленого ФТЧ у якості глушника шуму та/або іскрогасника системи випуску ВГ дизеля, а також його розміщення на борту авто-транспортного засобу поза підкапотного простору.

*Ключові слова:* дизель, відпрацьовані гази, екологічність, тверді частинки, фільтр твердих частинок.

**Кондратенко А.Н. Снижение выброса твердых частиц транспортных дизелей, находящихся в эксплуатации.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2013.

Диссертация посвящена улучшению экологических показателей дизельных ДВС, путем очистки их отработавших газов от твердых частиц разработанным фильтром твердых частиц с фильтрующим элементом оригинальной конструкции.

Разработан ФТЧ дизеля модульной конструкции, ФЭ которого не содержит каталитических покрытий (фильтр должен быть нечувствителен к использованию некачественных моторных топлив и масел) и изготовлен из недефицитных материалов отечественного производства, имеющих малую стоимость (на сегодняшний день для одного модуля ФЭ составляет 2,0 грн.).

Экспериментально получены гидравлические характеристики различных вариантов конструкции модуля ФЭ по разработанной методике на разработанной и изготовленной безмоторной исследовательской установке. Выбраны конфигурации для дальнейших исследований.

Проведено расчетное исследование процесса движения аэрозоля "ОГ дизеля – ТЧ" в модуле ФЭ с помощью математической модели движения идеального газа программного комплекса COSMOS FloWorks, адаптированной к объекту исследования с помощью дополнения ее данными о физических свойствах аэрозоля и материалов модуля, а также значениями граничных условий, полученными из справочной литературы и экспериментально. Подход к моделированию стальных тканых сеток и насыпок из природных жаростойких сорбентов как пористых тел, использование свойства симметрии конфигурации модуля, а также подход к расчету гидравлического сопротивления модуля как аддитивной величины, позволили сократить время расчета.

Экспериментально исследованы рабочие характеристики разработанных и изготовленных действующих макетных образцов ФЭ по разработанной методике на моторном испытательном стенде с дизелем 2Ч10,5/12 и модернизированными системами выпуска и отбора проб ОГ на токсичность. В результате окончательно выбрана конструкция модуля ФЭ, для которой получены зависимости гидравлического сопротивления и эффективности очистки ОГ дизеля от ТЧ от режи-

мных и конструктивных параметров дизеля.

Таким образом, разработанный ФЭ ФТЧ дизеля характеризуется малым гидравлическим сопротивлением (в незагрязненном состоянии – до 4 кПа во всем диапазоне рабочих режимов дизеля и до 15 кПа в пределах 8-часовой рабочей смены), высокой технологичностью производства и такой степенью очистки ОГ дизеля от ТЧ, которая позволяет снизить среднеэксплуатационный выброс ТЧ с ОГ дизеля 2Ч10,5/12, оцененный для 13-ти и 8-ми режимных испытательных циклов, на 62,9 и 52,3 % (это позволяет привести дизель в соответствие следующему уровню норм токсичности ОГ EURO). При этом удельный массовый расход топлива дизелем повышается всего на 4,35 %. Применение в конструкции ФЭ насыпки из ПЦ, брикетированной в кассетах из СНТС, способствует повышению эксплуатационной надежности фильтра за счет отсутствия склонности к термошоковому разрушению его материалов. ФЭ для дизеля с рабочим объемом 2,0 дм<sup>3</sup>, содержащий не менее 30 модулей, весит 2,0 кг и имеет габаритные размеры 60 × 90 × 170 мм. Эти показатели не превышают показателей ближайших аналогов. Модульная конструкция фильтра позволяет построить на его основе типоряд ФТЧ для транспортных дизелей различной мощности. Регенерация фильтра возможна любым из известных методов. Разработаны схема и принцип работы системы регенерации для разработанного ФТЧ, содержащей плазмотрон, оценены затраты энергии для ее работы. Возможно, при определенных условиях, использование разработанного фильтра в качестве глушителя шума и/или искрогасителя системы выпуска ОГ дизеля, а также его размещение на борту автотранспортного средства вне подкапотного пространства.

*Ключевые слова:* дизель, отработавшие газы, экологичность, твердые частицы, фильтр твердых частиц.

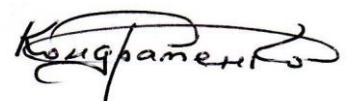
**Kondratenko O.M. Reduction of emissions of the particulate matter of vehicle diesel engines under operating conditions.** – On the rights of a manuscript.

Thesis for a candidate`s degree by speciality 05.05.03 – Engines and Energy Plants. – National Technical University “Kharkov Polytechnical Institute”. – Kharkov, 2013.

The dissertation is devoted to improvement of ecological performance of vehicle diesel internal combustion engines (ICE) by purification of their exhaust gases (EG) from the particulate matter (PM) by filter with original design of filter element (FE).

A diesel particulate filter (DPF), which was designed, has a modular construction. Its FE, which does not contain a catalytic coatings (DPF is insensitive to the use of low-quality motor fuels and oils), is made of non-deficient material of domestic production with low cost (to date their price is about 2,0 UAH per one module of FE). Also, the FE is characterized by low hydraulic resistance (for clean filter – up to 4 kPa over the entire range of operating modes of diesel engine and up to 15 kPa during one 8-hour work shift), high manufacturability and the degree of cleaning of diesel EG from PM greater than 77,4 %. It helps to reduce the average emission of the PM with EG of diesel 2Ch10,5/12, estimated for 13- and 8-modes test cycles, at 62,9 and 52,7 % (it results to the fact that a diesel engine will be in accordance with the next level of the EURO Norm), with the mass flow rate of diesel fuel increased only at 4,35 %. Application in the design of FE a bulk natural zeolite, that patch of tape with stainless steel woven wire mesh, improves operational reliability of the DPF due to lack of thermal shock destruction of FE material. Mass and dimensions of the DPF does not exceed the value of that parameters for the closest analogues. The FE for 2-liter diesel engine consists of not less than 30 modules and weighting 2 kg, its dimensions are 60 × × 90 × 170 mm. Modular design of DPF allows to build on its core series of the DPFs for vehicle diesel engines for various power. Regeneration of the DPF is possible by any of known methods. Developed scheme and principle of work for the regeneration system of DPF, which containing the plasmotron, evaluated the expenses of energy for its operation. Developed DPF, under certain conditions, can be used as a muffler of noise and/or as a spark arrestor of exhaust system of diesel engine. It is also possible to place it onboard of vehicle outside of the engine compartment.

*Keywords:* diesel, exhaust gases, ecological performance, particulate matter, particulate matter filter.



Відповідальна за випуск Мокренко Н.М.

КОНДРАТЕНКО Олександр Миколайович

ЗНИЖЕННЯ ВИКИДУ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК  
ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ,  
ЩО ПЕРЕБУВАЮТЬ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки

Підписано до друку «25» листопада 2013 р.  
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.  
Цифровий друк. Умовн. друк. аркушів 1,0.  
Тираж 150 примірників. Замовлення № 99

---

Видавець і виготовлювач  
Копі-центр «МОДЕЛІСТ» (ФО-П Миронов М.В.),  
вул. Червонопрапорна, 3 літера Б-1, м. Харків-2, 61002  
Тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)

Свідоцтво про державну реєстрацію ВО № 022953 від 31.03.1994 р.

---

